



¿Cómo avanzar en la conservación de los bosques de *Polylepis* y su diversidad biológica?

Segovia-Salcedo, María Claudia ; Caiza Guamba, Joselin Carolina ; Kessler, Michael ; Ramsay, Paul
Michael ; Boza Espinoza, Tatiana Erika ; Renison, Daniel ; Quispe-Melgar, Harold Rusbelth ;
Urquiaga-Flores, Erickson ; Rodriguez-Caton, Milagros ; Ames-Martínez, Fressia Nathalie ;
Carabajo-Hidalgo, Aldemar ; Cabrera-Amaya, Diego M ; Romoleroux, Katya

Abstract: *Polylepis* is the dominant genus of the high Andean forest vegetation and they have a crucial ecological role. However, these forests are highly endangered and many of their biological aspects are still unknown. In this context, a series of questions were formulated with the aim that their resolution would contribute to a better understanding of *Polylepis*' dynamics and biological diversity, as well as improve their conservation efforts. Twenty one speakers from the V International Congress of Conservation and Ecology of *Polylepis* forests participated in the formulation of 67 questions related to these forests. Comments and additional information were received via email and google doc spreadsheet, open to the participants. Afterwards, two workshops were organized with the researchers to formulate, discuss, analyze and define the final list, narrowing down to a total of 40 questions. The questions were categorized into 6 different topics: Taxonomy, Ecology and Biogeography, Genetics, Conservation, Ethnobiology and Climate Change. We hope these questions will be considered as a priority for new research agendas and to define joint efforts for *Polylepis* forest conservation. El género *Polylepis* es dominante en los bosques a mayor elevación en los Andes y es de excepcional importancia ecológica. Sin embargo, estos bosques están gravemente amenazados y muchos aspectos de su biología permanecen poco conocidos. A razón de esto, identificamos preguntas que al ser resueltas contribuirán al mejor entendimiento de la dinámica de los bosques de *Polylepis* y con esto mejorar las acciones para su conservación y su diversidad biológica. Veintiún conferencistas que asistieron al V Congreso Internacional de Ecología y Conservación de los bosques de *Polylepis* participaron en la formulación de 67 preguntas asociadas a estos bosques. Los comentarios e insumos fueron recibidos mediante correo electrónico y a través de una matriz desarrollada en hojas de cálculo de google compartida con los participantes. Se realizaron dos talleres continuos con los investigadores, obteniendo una lista final de 40 preguntas formuladas, discutidas, analizadas y consensuadas. Las preguntas están divididas en 6 áreas temáticas: Taxonomía, Ecología y Biogeografía, Genética, Conservación, Etnobiología y Cambio Climático. Esperamos que estas preguntas sean consideradas como prioritarias para la agenda de investigación ya que pretenden generar un marco general para definir esfuerzos conjuntos para la conservación de los bosques de *Polylepis*.

DOI: <https://doi.org/10.1080/23766808.2021.1953895>

Posted at the Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich

ZORA URL: <https://doi.org/10.5167/uzh-205613>

Journal Article

Published Version



The following work is licensed under a Creative Commons: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) License.

Originally published at:

Segovia-Salcedo, María Claudia; Caiza Guamba, Joselin Carolina; Kessler, Michael; Ramsay, Paul Michael; Boza Espinoza, Tatiana Erika; Renison, Daniel; Quispe-Melgar, Harold Rusbelth; Urquiaga-Flores, Erickson; Rodriguez-Caton, Milagros; Ames-Martínez, Fressia Nathalie; Carabajo-Hidalgo, Alde-mar; Cabrera-Amaya, Diego M; Romoleroux, Katya (2021). ¿Cómo avanzar en la conservación de los bosques de *Polylepis* y su diversidad biológica? *Neotropical Biodiversity*, 7(1):318-326.

DOI: <https://doi.org/10.1080/23766808.2021.1953895>



¿Cómo avanzar en la conservación de los bosques de *Polylepis* y su diversidad biológica?

María Claudia Segovia-Salcedo, Joselin Carolina Caiza Guamba, Michael Kessler, Paul Michael Ramsay, Tatiana Espinoza Boza Espinoza, Daniel Renison, Harold Rusbelth Quispe-Melgar, Erickson Urquiaga-Flores, Milagros Rodriguez-Caton, Fressia Nathalie Ames-Martínez, Aldemar Carabajo-Hidalgo, Diego M Cabrera-Amaya & Katya Romoleroux

To cite this article: María Claudia Segovia-Salcedo, Joselin Carolina Caiza Guamba, Michael Kessler, Paul Michael Ramsay, Tatiana Espinoza Boza Espinoza, Daniel Renison, Harold Rusbelth Quispe-Melgar, Erickson Urquiaga-Flores, Milagros Rodriguez-Caton, Fressia Nathalie Ames-Martínez, Aldemar Carabajo-Hidalgo, Diego M Cabrera-Amaya & Katya Romoleroux (2021) ¿Cómo avanzar en la conservación de los bosques de *Polylepis* y su diversidad biológica?, Neotropical Biodiversity, 7:1, 318-326, DOI: [10.1080/23766808.2021.1953895](https://doi.org/10.1080/23766808.2021.1953895)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/23766808.2021.1953895>



© 2021 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



[View supplementary material](#)



Published online: 30 Jul 2021.



[Submit your article to this journal](#)



Article views: 591















[View related articles](#)



[View Crossmark data](#)

¿Cómo avanzar en la conservación de los bosques de *Polylepis* y su diversidad biológica?

María Claudia Segovia-Salcedo ^a, Joselin Carolina Caiza Guamba ^a, Michael Kessler^b, Paul Michael Ramsay ^c, Tatiana Espinoza Boza Espinoza ^{d,e}, Daniel Renison ^f, Harold Rusbelth Quispe-Melgar ^g, Erickson Urquiaga-Flores ^{b,e}, Milagros Rodríguez-Catón ^h, Fressia Nathalie Ames-Martínez ^g, Aldemar Carabazo-Hidalgo ⁱ, Diego M Cabrera-Amaya ^j and Katya Romoleroux ^k

^aDepartamento de Ciencias de la Vida y Agricultura, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador; ^bInstituto de Botánica Sistemática y Evolutiva, Universidad de Zurich, Zurich, Suiza; ^cDepartamento de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad de las Américas Puebla, San Andrés Cholula, Puebla, México; ^dInstituto de Ciencias de la Naturaleza, Territorio y Energías Renovables, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú; ^eHerbario Vargas CUZ, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Perú; ^fCentro de Ecología y Recursos Naturales Renovables, Dr. Ricardo Luti, Instituto de Investigaciones Biológicas y Tecnológicas, Universidad Nacional de Córdoba – CONICET, Córdoba, Argentina; ^gPrograma de Investigación de Ecología y Biodiversidad, Asociación ANDINUS, Sicaya, Huancayo, Junín, Perú; ^hLamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, New York, USA; ⁱDepartamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador; ^jYoluka ONG, Fundación de Investigación En Biodiversidad y Conservación, Bogotá D.C, Colombia; ^kEscuela De Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador

ABSTRACT

Polylepis is the dominant genus of the high Andean forest vegetation and they have a crucial ecological role. However, these forests are highly endangered and many of their biological aspects are still unknown. In this context, a series of questions were formulated with the aim that their resolution would contribute to a better understanding of *Polylepis*'s dynamics and biological diversity, as well as improve their conservation efforts. Twenty one speakers from the V International Congress of Conservation and Ecology of *Polylepis* forests participated in the formulation of 67 questions related to these forests. Comments and additional information were received via email and google doc spreadsheet, open to the participants. Afterwards, two workshops were organized with the researchers to formulate, discuss, analyze and define the final list, narrowing down to a total of 40 questions. The questions were categorized into 6 different topics: Taxonomy, Ecology and Biogeography, Genetics, Conservation, Ethnobiology and Climate Change. We hope these questions will be considered as a priority for new research agendas and to define joint efforts for *Polylepis* forest conservation.

RESUMEN

El género *Polylepis* es dominante en los bosques a mayor elevación en los Andes y es de excepcional importancia ecológica. Sin embargo, estos bosques están gravemente amenazados y muchos aspectos de su biología permanecen poco conocidos. A razón de esto, identificamos preguntas que al ser resueltas contribuirán al mejor entendimiento de la dinámica de los bosques de *Polylepis* y con esto mejorar las acciones para su conservación y su diversidad biológica. Veintiún conferencistas que asistieron al V Congreso Internacional de Ecología y Conservación de los bosques de *Polylepis* participaron en la formulación de 67 preguntas asociadas a estos bosques. Los comentarios e insumos fueron recibidos mediante correo electrónico y a través de una matriz desarrollada en hojas de cálculo de google compartida con los participantes. Se realizaron dos talleres continuos con los investigadores, obteniendo una lista final de 40 preguntas formuladas, discutidas, analizadas y consensuadas. Las preguntas están divididas en 6 áreas temáticas: Taxonomía, Ecología y Biogeografía, Genética, Conservación, Etnobiología y Cambio Climático. Esperamos que estas preguntas sean consideradas como prioritarias para la agenda de investigación ya que pretenden generar un marco general para definir esfuerzos conjuntos para la conservación de los bosques de *Polylepis*.

ARTICLE HISTORY

Received 18 June 2021

KEYWORDS

research agenda; mountain forests; priority definitions; South America

KEYWORDS


Palabras claves; agenda de investigación; bosques montañosos; definición de prioridades; Sudamérica

Introducción

Polylepis es un género endémico de los Andes y sistemas montañosos asociados, con una distribución desde la Sierra Nevada de Mérida en Venezuela, hasta el norte de Chile y las Sierras de Comechingones en el centro de Argentina [1,2]. Su rango altitudinal oscila entre 900 m s.n.m. en

Córdoba, Argentina, hasta 5000 m s.n.m. en el volcán Sajama en Bolivia [3,4]. Los bosques de *Polylepis* se destacan por desarrollarse en altitudes muy elevadas donde otras angiospermas leñosas ya no forman bosques [5,6]. Con frecuencia se presentan como parches aislados dentro de una matriz de pajonales y zonas arbustivas de alta montaña [6,7], aunque posiblemente corresponden a vegetación natural remanente que

CONTACT Katya Romoleroux  kromoleroux@puce.edu.ec

 Supplemental data for this article can be accessed [here](#).

© 2021 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

queda resguardada en áreas escarpadas poco accesibles como deslizamientos de tierra, paredes rocosas, morrenas glaciares, pantanos, roquedales y quebradas [8–11].

Actualmente los bosques de *Polylepis* representan uno de los ecosistemas más amenazados de los Andes. Están en peligro de desaparecer debido al cambio climático y a la reducción del tamaño poblacional causadas principalmente por las actividades antrópicas [4,12–14]. La fragmentación de los bosques genera una serie de consecuencias como la disminución de la densidad arbórea, alteraciones en su microhábitat y cambios en la estructura de su vegetación [15]. Sin embargo, aún con la limitada extensión geográfica actual, estos bosques relictuales desempeñan un papel muy importante por sus servicios ecosistémicos como la regulación del ciclo hídrico, formación y conservación de suelos, soporte de biodiversidad, entre otros [6,7,16–18].

Ante la necesidad de ampliar nuestro conocimiento sobre la ecología, la conservación, taxonomía, biogeografía, genética, cambio climático y etnobiología, aspectos de importancia para los bosques de *Polylepis*, y difundir las investigaciones que se están llevando a cabo en cada país de la región andina sobre los bosques de *Polylepis*, se han organizado cinco congresos internacionales durante los últimos 20 años en diferentes países. El primer congreso internacional de *Polylepis* tuvo lugar en Cochabamba, Bolivia, en el año 2000; el segundo en Cusco, Perú, en 2006; el tercero en Arica, Chile, en 2013; el cuarto en Jujuy, Argentina, en 2016; y el quinto en Quito, Ecuador, en 2019. Durante estos años se han sumado más investigadores, estudiantes y aficionados de los bosques de *Polylepis* que han aportado con su experiencia al conocimiento en diferentes campos [2]. Sin embargo, cada vez se abren nuevas interrogantes acerca de estos icónicos árboles andinos.

El objetivo del presente artículo es proporcionar una breve lista de preguntas abiertas para futuras investigaciones sobre la ecología y conservación de los bosques de *Polylepis*. La intención es direccionar futuros programas y agendas de investigación, relacionadas a estos bosques. Nuestra lista no pretende ser exhaustiva, ya que quedan muchas preguntas importantes, pero esperamos que fomente el trabajo adicional en estas áreas. Las preguntas están formuladas con base a los resultados, exposiciones, comentarios y sugerencias recogidos en el V Congreso Internacional en 2019. El V Congreso Internacional de Ecología y Conservación de los bosques de *Polylepis* fue realizado con un total de 153 participantes. En este congreso se ofrecieron 50 charlas, de las cuales nueve fueron magistrales, y se expusieron nueve afiches. Como uno de los primeros resultados, se documentaron todos los resúmenes de las charlas presentadas en este V Congreso mediante la publicación del libro de resúmenes digital [19].

Métodos y desarrollo

En marzo del 2021 se convocó a los conferencistas que asistieron al V Congreso Internacional de Ecología y Conservación de los bosques de *Polylepis*. Veintiún conferencistas de 9 países, especialistas en diferentes áreas relacionadas al género *Polylepis*, participaron en la formulación de las preguntas asociadas a estos bosques. En la lista de preguntas originales se detalla la información de los participantes y sus instituciones asociadas (Tabla 1 Material suplementario).

Cada participante generó varias preguntas en las siguientes áreas temáticas: Taxonomía, Ecología, Biogeografía, Genética, Conservación, Etnobiología y Cambio Climático. La recopilación de la información fue a través de correos electrónicos y una matriz desarrollada en hojas de cálculo de Google compartida con los participantes.

Las preguntas cumplieron con los siguientes criterios: (1) se basan en un diseño de investigación a corto y mediano plazo, (2) las respuestas no deben ser dicotómicas, (3) deben abordar vacíos importantes en el conocimiento y (4) no deben ser específicas para una especie de *Polylepis* en particular. En esta primera etapa, se obtuvo un total de 67 preguntas (Tabla 1 Material suplementario).

La lista de preguntas fue enviada a todos los participantes para que sea revisada antes del taller de discusión. Se eliminaron los nombres y afiliaciones de los autores para reducir el sesgo potencial. Se realizaron dos talleres virtuales con 14 y 12 participantes respectivamente. En el primer taller, se analizaron las preguntas de las siguientes áreas temáticas: Taxonomía, Ecología, Biogeografía y Conservación. Además, se reformuló, preseleccionó y unificó el área de Ecología con el área de Biogeografía.

De igual manera, se realizó un segundo taller virtual de discusión para analizar las preguntas de las siguientes áreas temáticas: Genética, Etnobiología y Cambio Climático. En este segundo taller se categorizaron las preguntas de todas las áreas temáticas, iniciando en cada área temática con una pregunta reformulada que introduzca cada tema. Se redujo la lista a 42 preguntas abarcando seis áreas temáticas. Se recibieron comentarios y reformulaciones de las preguntas, obteniendo una lista final de 40 preguntas.

Las preguntas, descritas a continuación, se agruparon en las seis áreas temáticas principales que abordan temas relevantes para el género *Polylepis*.

Taxonomía

El género *Polylepis* presenta una alta plasticidad morfológica, tanto dentro de poblaciones que crecen en microhábitats con diferente suministro de agua [20], como entre poblaciones de la misma especie separadas geográficamente [21]. Adicionalmente, debemos

considerar que la hibridación está muy extendida entre las Rosáceas [22–24]. *Polylepis* no es una excepción, aunque esto se omitió durante mucho tiempo debido a la similitud entre las especies y a la dificultad de identificar híbridos. Además de los eventos de hibridación entre taxones existentes, algunos de los cuales pueden deberse a una influencia antrópica [5,20,21,25,26], también hay evidencia indirecta de especiación a través de la hibridación [27]. Todo sugiere que el flujo de genes entre especies puede ser más frecuente de lo que se infiere a través de la morfología [28]. Al mismo tiempo, la presencia de diferentes niveles de ploidía sugiere que puede haber barreras para el flujo de genes dentro de las especies [8,26,29,30]. La apomixis aún no se ha documentado en *Polylepis*, pero existe una alta probabilidad de que se encuentre, considerando su presencia en varios géneros de las Rosáceas. En conclusión, nuestra comprensión de la historia evolutiva de *Polylepis* es todavía muy incompleta. Si bien los rasgos morfológicos apuntan a una historia plausible de diversificación y adaptación de bosques nubosos húmedos a hábitats áridos de mayor altitud, los datos moleculares sugieren una historia evolutiva compleja y reticulada. Aquí recopilamos preguntas que abarcan los cuestionamientos centrados en taxonomía.

- (1) ¿Cuál es el origen de potenciales especies de influencia antrópica? ¿Existen especies naturales o resultado de hibridación y selección antropogénica? ¿Cuántas formas (variedades o subespecies) se puede distinguir y cuál es su distribución?
- (2) ¿Cómo reconocer taxonómicamente formas juveniles dentro del género *Polylepis*?
- (3) ¿Cómo varía la plasticidad fenotípica a lo largo de gradientes ambientales en diferentes especies de *Polylepis*?
- (4) ¿Cómo considerar poliploidía e hibridación en la taxonomía del género *Polylepis*?
- (5) ¿Qué implicaciones tendrán los estudios moleculares sobre la taxonomía del género *Polylepis*? ¿Qué caracteres (moleculares y morfológicos) pueden ayudar a aclarar la taxonomía?

Ecología y biogeografía

La ecología de *Polylepis* y las especies asociadas es de interés intrínseco, así como de valor práctico para la predicción de su distribución y su manejo. Los propios bosques son desafiantes debido a su complejidad estructural. Los troncos contorsionados y múltiples de *Polylepis* hacen que las técnicas estándar de estudio forestal sean menos útiles para describir la estructura física tridimensional de los bosques y comprender las edades y las tasas de crecimiento de los árboles. Además, los rangos latitudinales y altitudinales de *Polylepis* dificultan la generalización de las condiciones necesarias para su regeneración

y colonización. Algunas especies asociadas podrían depender directamente de los árboles de *Polylepis*, otras de los hábitats que éstos crean. Las expansiones y contracciones históricas de las áreas cubiertas por bosques de *Polylepis* sugieren que cierta biodiversidad asociada podría adaptarse a la cubierta irregular de los bosques a escala paisajística, y la evidencia de las aves que habitan en estos bosques apoya esta visión [31]. Es probable que los tamaños, configuraciones y cobertura general de los bosques de *Polylepis* en la escala del paisaje varíe entre especies [32]. Estas interacciones son fundamentales en la toma de decisiones para implementar los planes de restauración, en vista que al aumentar el tamaño de los bosques se mitiga la pérdida de biodiversidad asociada y se equilibran los niveles tróficos [32,33]. La integridad y resiliencia de la biodiversidad de bosques de *Polylepis* depende de una gama mucho más amplia de especies de las que se han estudiado hasta ahora. Las interacciones de los parches de bosques de *Polylepis* con hábitats circundantes merecen más atención, tanto en términos de efectos de borde dentro de los bosques, como la influencia de los bosques en hábitats cercanos. Aquí presentamos una selección de preguntas claves para estimular ideas de investigación ecológica en el futuro:

- (1) ¿Qué metodologías se pueden aplicar para medir la estructura etaria en los bosques de *Polylepis*?
- (1) ¿Cómo afecta la variabilidad geológica, topográfica y climática a la estructura naturalmente diversa de los bosques de *Polylepis*?
- (2) ¿Qué factores influyen en la regeneración, colonización, dinámica sucesional y estructura poblacional de las especies de *Polylepis* en distintos ambientes?
- (3) ¿Qué aspectos embrionarios, ambientales y genéticos afectan el porcentaje de viabilidad de las semillas y cómo influyen en el mantenimiento de las poblaciones de *Polylepis* a mediano y largo plazo?
- (4) ¿Cuáles son las ventajas y riesgos ecológicos de utilizar especies introducidas del género *Polylepis* para la reforestación en áreas cercanas y/o colindantes a las especies nativas?
- (5) ¿Cómo varían los servicios ecosistémicos de las especies de *Polylepis* en diferentes ambientes?
- (6) ¿La biodiversidad asociada a los bosques de *Polylepis* está relacionada al género *Polylepis* o a especies particulares de este género? ¿Qué tipos de interacciones biológicas ocurren entre las especies que conforman el bosque?
- (7) ¿Cómo influyen la estructura y fragmentación del bosque de *Polylepis* en el resto de la biodiversidad asociada?
- (8) ¿Cómo podría la diversidad estructural natural de los bosques fomentar una resiliencia en los organismos asociados frente a perturbaciones humanas y cambios climáticos?

- (9) ¿Qué tan lejos del borde llega la influencia de los hábitats circundantes en la estructura, ambiente y biodiversidad dentro del bosque? ¿Qué influencia tienen los bosques en los hábitats circundantes?

Conservación, manejo y restauración

Los bosques de *Polylepis* son considerados como uno de los ecosistemas alto andinos más amenazados del mundo [4,14], a pesar de que muchos de ellos se encuentran distribuidos en zonas remotas e inaccesibles. Ellenberg [34], en los años 70, ya destacó la influencia humana en estos parches de bosque. Con los años, los cambios son más evidentes y los impactos más profundos. Es en una carrera contra el tiempo para generar información que permita decidir qué porciones de los ecosistemas van a ser usadas para el beneficio inmediato, cuáles se pueden conservar para el uso y provecho en el futuro, cómo manejarlas y qué restaurar de lo que se ha perdido. En la actualidad, las áreas que potencialmente podrían ser ocupadas por bosques andinos de *Polylepis* son intervenidas de múltiples formas, provocando que la extensión y calidad de sus bosques se reduzcan, mantengan o expandan según su actividad y ubicación. Renison et al. [2], señalan que hay un incipiente pero creciente número de investigaciones que facilitan la conservación, manejo y restauración de los bosques de *Polylepis*. Las preguntas relevantes para la conservación, manejo y restauración de *Polylepis* son las siguientes:

- (1) ¿Cómo identificar áreas prioritarias para conservación, manejo y restauración? Y en particular, ¿Cómo podemos usar las herramientas de información geográfica (sensores remotos)?
- (2) ¿Cuál es el estado de conservación actual de las especies de *Polylepis* a diferentes escalas espaciales?
- (3) ¿Qué planes de acción se pueden aplicar para la conservación, manejo y restauración de un grupo evolutivo de especies de *Polylepis*, que incluya especies puras, posibles híbridos y especies introducidas?
- (4) ¿Cuál es el efecto de los animales domésticos y el fuego sobre la supervivencia, regeneración y crecimiento en las distintas especies de *Polylepis*?
- (5) ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de utilizar técnicas de cultivo de tejidos vegetales, esquejes, recolección de semillas, plántulas de bosques, regeneración natural para la propagación y restauración de estos bosques?
- (6) ¿Qué porcentaje de semillas germinan en las distintas especies de *Polylepis* y cómo podemos mejorar el porcentaje de germinación con el fin

de facilitar la producción de plántulas para su reforestación?

Cambio climático

Los ecosistemas montañosos se ven fuertemente afectados por el cambio climático. Adicionalmente, la topografía montañosa puede ocasionar cambios marcados en la precipitación y condensación. En el pasado, tales cambios climáticos han llevado a evidentes movimientos en la distribución de los ecosistemas altoandinos [35] y se espera que en el futuro ocurra lo mismo [36]. Sin embargo, hasta el presente, la expansión altitudinal de líneas superiores de bosques (en inglés “treeline”), no se ha evidenciado mayormente a nivel mundial. Posiblemente, este efecto es el resultado de limitaciones naturales en la dispersión y el establecimiento de árboles, así como de cambios en el uso de suelo [37,38]. El cambio climático no solo afecta a la distribución de los bosques, sino también aspectos como el crecimiento de los árboles [39], la densidad de bosques [40], y la presión por parásitos y herbívoros [41], entre otros. En el caso de los bosques de *Polylepis*, solo tenemos observaciones puntuales del efecto de cambios climáticos en el pasado [42,43] y algunos reportes actuales [44,45]. Sin embargo, falta una visión global de los riesgos (p. ej. aumento de mortalidad) y las oportunidades (p. ej. mayor crecimiento) asociadas al cambio climático. Las siguientes preguntas presentan pautas de los aspectos que hemos recopilado como los más importantes para entender los efectos del cambio climático sobre ecosistemas de *Polylepis* y proveer lineamientos de acción.

- (1) ¿Cómo incide el cambio climático sobre la dinámica del bosque de *Polylepis*? ¿Cuál es el impacto en los organismos parásitos y herbívoros en los bosques de *Polylepis*?
- (2) ¿Cuáles son los mecanismos de defensa de los árboles de *Polylepis* ante organismos parásitos y herbívoros frente a drásticos cambios de temperatura en los bosques? ¿Qué herramientas de gestión del bosque podrían ayudar a su conservación?
- (3) ¿Cómo cambiaría el uso del suelo de los ecosistemas altoandinos frente al cambio climático? ¿Cómo afectaría a los bosques de *Polylepis*?
- (4) ¿Hasta qué grado se pueden adaptar los bosques de *Polylepis* a los cambios climáticos a una escala local? ¿Cómo afectarían a los servicios ecosistémicos que prestan estos bosques?
- (5) ¿Cuáles son los patrones de migración natural de los bosques de *Polylepis* en reacción al cambio climático? ¿Cuáles son los factores (altitud, escala temporal, velocidad) que influyen en este proceso? ¿Cómo se puede asistir a esta migración?

- (6) ¿Cuál es el rol de las variaciones climáticas y la pérdida de masa boscosa a diferentes escalas temporales en el contexto de su distribución geográfica, evolutiva y diversidad genética actual de *Polylepis*?

Genética

Los escasos estudios genéticos se han centrado en pocas especies del género (*P. tarapacana*, *P. rugulosa*, *P. incana*, *P. pauta*, *P. australis* y *P. besseri*), siendo una gran incógnita lo que sucede en las demás especies. Aragundi, Hamrick y Parker [46], estudiando 12 poblaciones de *P. pauta* en Ecuador, encontraron niveles de polimorfismo y diversidad genética mayor de lo esperado para especies polinizadas por el viento, mientras que, Gareca et al. [47] no encuentran una relación entre tamaño poblacional y diversidad genética al analizar *P. besseri*, y en general la diferenciación genética fue baja comparada con especies similares [48]. Al momento entendemos que esta diversidad genética está influenciada por la interacción del ambiente [46,49] y la historia asociada a las alteraciones humanas [49–52]. Necesitamos comprender cómo las diferencias altitudinales y climáticas entre el norte, centro y sur de los Andes afectan a la diversidad genética de este género. Entender cómo la orografía de los Andes, junto con la poliploidía y la hibridación natural, donde la selección natural y otras fuerzas evolutivas han actuado, generan diferencias en las frecuencias de variantes genéticas. En este contexto, hemos tratado de recopilar las preguntas más importantes para el género *Polylepis* dentro del ámbito de la Genética.

- (1) ¿Está la identidad de especies de *Polylepis* determinada por diferencias a nivel genómico o por pocos genes?
- (2) ¿Cuánto flujo genético existe entre especies simpátricas de *Polylepis*?
- (3) ¿Cuál es la variabilidad genética entre poblaciones alopátricas de *Polylepis*?
- (4) ¿Cuánto flujo genético hay entre diferentes niveles de ploidía dentro de las especies de *Polylepis*?
- (5) ¿Qué impactos genera la multiplicación clonal de individuos en la diversidad genética de bosques de *Polylepis* expuestos a hábitats con diferentes grados de perturbación y condiciones extremas?
- (6) ¿Cuál es el rol de la apomixis en la diversidad genética y la evolución del género *Polylepis*?
- (7) ¿Cuánto flujo genético existe entre especies de plantas y de animales que viven dentro de bosques a nivel del paisaje? ¿Qué planes de acción se deberían aplicar para conservar la diversidad genética de esas especies asociadas?
- (8) ¿Cómo afecta la hibridación a nivel genético entre especies nativas e introducidas?

Etnobiología

La perspectiva etnobiológica nos ayuda a dilucidar las interrelaciones entre la biodiversidad, los seres humanos, y sus consecuencias evolutivas [53], lo cual nos permite fortalecer la colaboración transcultural y el intercambio de conocimientos y tradiciones [54,55]. Los bosques de *Polylepis* han sido utilizados por miles de años como un símbolo económico, cultural y social por las culturas pre-incaicas e incaicas [56]. En varias regiones, el impacto ecológico de los cambios post-coloniales en el uso de suelo es evidente, donde plantas nativas como *Polylepis* han sido sobreexplotadas. Se explota principalmente su madera para construcción de casas, cercas, leña y carbón. Actualmente es usado como controlador de la erosión de suelos degradados de páramo [57–60]. Existen algunos estudios etnobiológicos relacionados con *Polylepis* y las comunidades humanas asociadas. En Ecuador, se ha reportado el uso de *Polylepis reticulata* en la comunidad Kichwa Quindihua de la provincia de Bolívar, donde esta especie es utilizada en sus actividades diarias [59]. Algunas de las especies de *Polylepis* tienen usos medicinales. Monigatti [54], encontró que las semillas de *Polylepis incana* son usadas para infecciones estomacales y edemas en el norte del Perú. En una evaluación de los usos etnobotánicos de *Polylepis incarum* y *P. pacensis* en Bolivia, Hurtado et al. [61] encontraron que las comunidades indígenas Aymara utilizan estos árboles directamente como medicina, ritual, combustible y material de construcción; e indirectamente para la protección de suelos y hábitat de plantas medicinales. Todavía hay mucho por conocer sobre la íntima relación entre los bosques de *Polylepis* y las comunidades andinas. En este contexto, presentamos las siguientes preguntas dentro de esta área de investigación.

- (1) ¿Cuál es la relación de convivencia entre los bosques nativos de *Polylepis* y los pobladores locales?
- (2) ¿Cuáles son los beneficios de los pueblos que dependen directamente de la existencia de los bosques de *Polylepis*?
- (3) ¿Cómo se podría co-construir el conocimiento, las acciones y toma de decisiones con respecto a los bosques de *Polylepis* con poblaciones locales e indígenas?
- (4) ¿De qué manera se puede descolonizar el estudio de los bosques de *Polylepis*?
- (5) ¿Cuáles son los factores geográficos, ambientales y sociales que afectan al uso de los bosques de *Polylepis* por los pobladores locales?

Conclusiones

En los últimos años, los bosques de *Polylepis* han llamado la atención de los investigadores debido a su

importante papel en los ecosistemas altoandinos y montanos, la diversidad biológica que albergan, su fragilidad y alto endemismo, las amenazas que sufren, así como sus adaptaciones en relación al cambio climático [15,62–71]. En este contexto, presentamos 40 preguntas enfocadas a la investigación de los bosques de *Polylepis* en diferentes áreas temáticas. En algunos casos, las preguntas se han ampliado intencionalmente para que los investigadores las adapten a sus áreas de investigación, puedan ser combinadas, y aplicadas a diferentes niveles de conocimiento. Muchas de las preguntas presentan una relación entre los aspectos ecológicos y evolutivos de estos bosques, así como su rol en los ecosistemas altoandinos. Algunos temas tratan aspectos sobre conservación de especies asociadas, genética poblacional, ecología de paisajes, etnobotánica, y cambio climático. Es importante recalcar que la mayoría de las áreas ya presentan avances de investigación como lo indica Renison et al. [2]. Algunas de estas investigaciones se desarrollan desde una perspectiva descriptiva y asociada a lugares específicos, o desde nuevas áreas como la biología molecular y -sophisticados métodos numéricos.

En el proceso de la organización de las preguntas, uno de los desafíos más importantes fue dividir la información en diferentes tópicos, lo que nos demuestra la necesidad de integrar conocimiento entre áreas, como ecología y biogeografía, ecología y cambio climático, genética y conservación, entre otros. Muchos de los temas analizados han intrigado a los investigadores por varias décadas, y su vigencia continúa. En este artículo se consideraron las propuestas recomendadas por Sutherland et al. [72–74], que mencionan la relevancia de identificar preguntas en ecosistemas específicos, como es el caso de los bosques de *Polylepis*. Este enfoque permite crear una red de investigadores especializados en diferentes áreas temáticas que en conjunto pueden analizar el panorama actual de *Polylepis*. Estamos convencidos de que la colaboración es esencial en el proceso de generación de conocimiento y conservación de los bosques, donde investigadores, técnicos, tomadores de decisiones, agentes de desarrollo, comunidades indígenas y pobladores dependientes de estos ecosistemas, trabajemos en conjunto con objetivos comunes [75,76]. Esperamos que estas preguntas sean consideradas como prioritarias para la agenda de investigación ya que pretenden generar un marco general para definir esfuerzos conjuntos para la conservación de estos bosques andinos. Además, pretendemos motivar a diversas instituciones y tomadores de decisiones a financiar y a participar en proyectos relacionados con el área de conservación y manejo de los bosques de *Polylepis*. De esta manera, se logrará responder a todas las preguntas formuladas en este ejercicio y proteger ecosistemas en riesgo de extinción.

Agradecimientos

Agradecemos a las siguientes instituciones que colaboraron para el desarrollo del V Congreso Internacional de Ecología y Conservación de los Bosques de *Polylepis*: Wild World Foundation (WWF-Ecuador); Fondo para la Protección del Agua (FONAG); Instituto Nacional de Biodiversidad (INABIO); Asociación Botánica Ecuatoriana (ABE); Germoplasma; Fundación Jocotoco Ecuador; Aves y Conservación; Asociación de Ecosistemas Andinos (ECOAN); Embajada de la República Federal de Alemania; Herbario QCA.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

ORCID

María Claudia Segovia-Salcedo  <http://orcid.org/0000-0002-7597-2977>
 Joselin Carolina Caiza Guamba  <http://orcid.org/0000-0001-6227-0549>
 Paul Michael Ramsay  <http://orcid.org/0000-0001-7631-6480>
 Tatiana Espinoza Boza Espinoza  <http://orcid.org/0000-0002-9925-1795>
 Daniel Renison  <http://orcid.org/0000-0002-1817-6552>
 Harold Rusbelth Quispe-Melgar  <http://orcid.org/0000-0001-6676-0879>
 Erickson Urquiaga-Flores  <http://orcid.org/0000-0002-1221-4116>
 Milagros Rodriguez-Caton  <http://orcid.org/0000-0002-9608-0150>
 Fressia Nathalie Ames-Martínez  <http://orcid.org/0000-0003-2840-3154>
 Aldemar Carabazo-Hidalgo  <http://orcid.org/0000-0001-9321-3942>
 Diego M Cabrera-Amaya  <http://orcid.org/0000-0002-5120-5044>
 Katya Romoleroux  <http://orcid.org/0000-0002-0679-9218>

References

- Arnal H, Sampson A, Navarro G, et al. and ES. Mapa pan Andino de bosques de *Polylepis* prioritarios para conservación. USA; 2014.
- Cuyckens GAE, Renison D, Morales L, et al. Ecología y conservación de los bosques y arbustales de *Polylepis*: ¿qué sabemos y qué ignoramos? 2018;28:163–174.
- Renison D, Pacheco S, Pacheco S, et al. Distribución y estado de conservación de las poblaciones de árboles y arbustos del género *Polylepis* (Rosaceae) en las montañas de Argentina. Ecol Austral. 2013;23 (1):27–36.
- Cuyckens GAE, Christie DA, Domic AI, Domic AI, et al. Climate change and the distribution and conservation of the world's highest elevation woodlands in the South American Altiplano. Glob Planet Change. 2016;137:79–87.

- [5] Kessler M. Polylepis-Wälder Boliviens: taxa, Ökologie, Verbreitung-und Geschichte. In: Cramer. SJ, editor. Diss bot 246 diss bot. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung; 1995; 202-204.
- [6] Fjeldså J& MK. Conservación de la biodiversidad de los bosques de Polylepis de las tierras altas de Bolivia. Una contribución al manejo sostenible en los Andes. DIVA Technical Report 11. Santa Cruz de la Sierra; 2004.
- [7] Cingolani AM, Poca M, Giorgis MA, et al. Water provisioning services in a seasonally dry subtropical mountain: identifying priority landscapes for conservation. *J Hydrol.* 2015;525:178–187.
- [8] Kessler M, Toivonen JM, Sylvester SP, et al. Elevational patterns of Polylepis tree height (Rosaceae) in the high Andes of Peru: role of human impact and climatic conditions. *Front Plant Sci.* 2014;5:194.
- [9] Renison D, Chartier MP, Menghi M, et al. Spatial variation in tree demography associated to domestic herbivores and topography: insights from a seeding and planting experiment. *For Ecol Manage.* 2015;335: 139–146.
- [10] Sylvester SP, Sylvester MDP V, Kessler M. Inaccessible ledges as refuges for the natural vegetation of the high Andes. *J Veg Sci.* 2014;25(5):1225–1234.
- [11] Sylvester SP, Heitkamp F, Sylvester MDP V, et al. Relict high-Andean ecosystems challenge our concepts of naturalness and human impact. *Sci Rep.* 2017;7 (1):1–13.
- [12] Martínez O, Villarte F. Estructura dasométrica de las plantas de un parche de Polylepis besseri incarum y avifauna asociada en la Isla del Sol (Lago Titicaca, La Paz-Bolivia). *Ecol En Boliv.* 2009;44:36–49.
- [13] Arrázola S, Coronado I, Torrico L, et al. GN& WF. Polylepis incarum. *Libr Rojo la Flora Amenazada Boliv Vol I-Zona Andin.* La Paz; 2012. p. 44–45.
- [14] Arrázola S& IC. Polylepis pacensis. *Libr Rojo la Flora Amenazada Boliv Vol I-Zona Andin.* La Paz; 2012. p. 338–339.
- [15] Romoleroux K, Tandalla DC, Erler R, et al. Plantas vasculares de los bosques de Polylepis en los páramos de Oyacachi. Quito, Ecuador: Pontificia Universidad Católica del Ecuador; 2016.
- [16] Kessler M. The “Polylepis problem”: where do we stand. *Ecotropica.* 2002;8:97–110.
- [17] Gareca EE, Hermy M, Fjeldså J, et al. Polylepis woodland remnants as biodiversity islands in the Bolivian high Andes. *Biodivers Conserv.* 2010;19(12): 3327–3346.
- [18] Renison D, Hensen I, Suarez R, et al. Soil conservation in Polylepis mountain forests of Central Argentina: is livestock reducing our natural capital? *Austral Ecol.* 2010;35(4):435–443.
- [19] Caiza J CS& KR. Libro de Resúmenes del V Congreso Internacional de Ecología y Conservación de los bosques de Polylepis. Quito, Ecuador: V CIP2019; 2019.
- [20] Kessler M. The genus polylepis (Rosaceae) in Bolivia. *Candollea.* 1995;50:131–171.
- [21] Simpson BB A revision of the genus polylepis (Rosaceae: Sanguisorbeae). *Smithson Contrib to Bot.* 1979;1–62.
- [22] Dickinson TA, Lo E, Talent N. Polyploidy, reproductive biology, and Rosaceae: understanding evolution and making classifications. *Plant Syst Evol.* 2007;266(1–2):59–78.
- [23] Lo EYY, Stefanović S, Christensen KI, et al. Evidence for genetic association between East Asian and western North American *Crataegus* L. (Rosaceae) and rapid divergence of the eastern North American lineages based on multiple DNA sequences. *Mol Phylogenet Evol.* 2009;51(2):157–168.
- [24] Robertson A, Rich TCG, Allen AM, et al. Hybridization and polyploidy as drivers of continuing evolution and speciation in *Sorbus*. *Mol Ecol.* 2010;19(8):1675–1690.
- [25] Simpson BB. Speciation and specialization of polylepis in the Andes. In: Vulllemeire F, Monasterio M, editors. *Trop Biogeogr.* Oxford, UK: Oxford University Press; 1986. p. 304–316.
- [26] Romoleroux K. Flora of Ecuador. In: Harling G, Andersson L, editors. *Rosaceae.* Copenhagen: Council for Nordic Publications in Botany; 1996. p. 71–89.
- [27] Kessler M, Schmidt-Lebuhn AN. Taxonomical and distributional notes on Polylepis (Rosaceae). *Org Divers Evol.* 2006;6(1):67–70.
- [28] Kerr MS A phylogenetic and biogeographic analysis of Sanguisorbeae (Rosaceae), with emphasis on the Pleistocene radiation of the high Andean genus Polylepis. 2004.
- [29] Schmidt-Lebuhn AN, Kessler M, Kumar M. Promiscuity in the Andes: species relationships in polylepis (Rosaceae, Sanguisorbeae) Based on AFLP and morphology. *Syst Bot.* 2006;31(3):547–559.
- [30] Schmidt-Lebuhn AN, Fuchs J, Hertel D, et al. An Andean radiation: polyploidy in the tree genus Polylepis (Rosaceae, Sanguisorbeae). *Plant Biol.* 2010;12(6):917–926.
- [31] Sevillano-Ríos CS, Rodewald AD. Responses of polylepis birds to patch and landscape attributes in the high Andes. *Neotrop Biodivers.* 2021;7(1):5–22.
- [32] Cahill JRA, Merckx T, Van Dyck H, et al. Lower density of arthropod biomass in small high-Andes Polylepis fragments affects habitat use in insectivorous birds. *Ecosphere.* 2021;12(3):e03401.
- [33] Pinos J. Challenges and conservation implications of polylepis woodlands in the Andean region: defining actions for sustainable management. *Hacquetia.* 2020;19(2):143–153.
- [34] Ellenberg H. Man's influence on tropical mountain ecosystems in South America. *J Ecol.* 1979;67 (2):401–416.
- [35] Flantua SGA, O'dea A, Onstein RE, et al. The flickering connectivity system of the north Andean páramos. *J Biogeogr.* 2019;46(8):1808–1825.
- [36] Holtmeier F, Broll G. Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales. *Glob Ecol Biogeogr.* 2005;14(5):395–410.
- [37] Harsch MA, Hulme PE, McGlone MS, et al. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecol Lett.* 2009;12 (10):1040–1049.
- [38] Naccarella A, Morgan JW, Cutler SC, et al. Alpine tree-line ecotone stasis in the face of recent climate change and disturbance by fire. *PLoS One.* 2020;15(4): e0231339.
- [39] Schwab N, Kaczka RJ, Janecka K, et al. Climate change-induced shift of tree growth sensitivity at a central Himalayan treeline ecotone. *Forests.* 2018;9 (5):267.
- [40] Greenwood S, Chen J, Chen C, et al. Strong topographic sheltering effects lead to spatially complex treeline advance and increased forest density in a subtropical mountain region. *Glob Chang Biol.* 2014;20(12):3756–3766.

- [41] Bentz BJ, Régnière J, Fettig CJ, et al. Climate change and bark beetles of the western United States and Canada: direct and indirect effects. *Bioscience*. 2010;60(8):602–613.
- [42] Zutta BR, Rundel PW. Modeled shifts in *Polylepis* species ranges in the Andes from the Last Glacial Maximum to the present. *Forests*. 2017;8(7):232.
- [43] Valencia BG, Bush MB, Coe AL, et al. *Polylepis* woodland dynamics during the last 20,000 years. *J Biogeogr*. 2018;45(5):1019–1030.
- [44] Marcora P, Hensen I, Renison D, et al. The performance of *Polylepis australis* trees along their entire altitudinal range: implications of climate change for their conservation. *Divers Distrib*. 2008;14(4):630–636.
- [45] Camel V, Arizapana-Almonacid M, Pyles M, et al. Using dendrochronology to trace the impact of the hemiparasite *Tristerix chodatianus* on Andean *polylepis* trees. *Plant Ecol*. 2019;220(9):873–886.
- [46] Aragundi S, Hamrick JL, Parker KC Genetic insights into the historical distribution of *polylepis* pauta (Rosaceae) in the northeastern Cordillera oriental of Ecuador. *Conserv Genet* [Internet]. 2011;12:607–618. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s10592-010-0165-x>.
- [47] Gareca EE, Breyne P, Vandepitte K, et al. Genetic diversity of Andean *Polylepis* (Rosaceae) woodlands and inferences regarding their fragmentation history. *Bot J Linn Soc*. 2013;172(4):544–554.
- [48] Schmidt-Lebuhn AN, Kumar M, Kessler M. An assessment of the genetic population structure of two species of *Polylepis* Ruiz & Pav. (Rosaceae) in the Chilean Andes. *Flora-Morphology, Distrib Funct Ecol Plants*. 2006;201(4):317–325.
- [49] Hensen I, Teich I, Hirsch H, et al. Range-wide genetic structure and diversity of the endemic tree line species *Polylepis australis* (Rosaceae) in Argentina. *Am J Bot*. 2011;98(11):1825–1833.
- [50] Julio N, Sobral A, Dueñas JR, et al. RAPD and ISSR markers indicate diminished gene flow due to recent fragmentation of *Polylepis australis* woodlands in central Argentina. *Biochem Syst Ecol*. 2008;36(5–6):329–335.
- [51] Julio NB, Dueñas JCR, Renison D, et al. Genetic structure and diversity of *Polylepis australis* (Rosaceae) tree populations from central Argentina: implications for forest conservation. *Silvae Genet*. 2011;60(1–6):55–61.
- [52] Hensen I, Cierjacks A, Hirsch H, et al. Historic and recent fragmentation coupled with altitude affect the genetic population structure of one of the world's highest tropical tree line species. *Glob Ecol Biogeogr*. 2012;21(4):455–464.
- [53] Schultes RE. The importance of ethnobotany in environmental conservation. *Am J Econ Sociol*. 1994;53(2):202–206.
- [54] Monigatti M Ethnobotany in the Northern Peruvian Andes: local knowledge on medicinal plant use. University of Zurich, Institute of Systematic Botany; 2011.
- [55] Declaration K. Ethnobotany, the science of survival: a declaration from Kaua'i. *Econ Bot*. 2007;61:1–2.
- [56] Capriles JM, Flores E. The economic, symbolic, and social importance of the “keñua” (*Polylepis* spp.) during prehispanic times in the Andean highlands of Bolivia. *Ecotropica*. 2002;8:225–231.
- [57] Brewbaker JL, Hutton EM. *Leucaena versatile* tropical tree legume. Boulder, Colorado: New Agric Crop; 1979.
- [58] Rodríguez MA, Angueyra A, Cleef AM, et al. Ethnobotany of the Sierra Nevada del Cocuy-Güicán: climate change and conservation strategies in the Colombian Andes. *J Ethnobiol Ethnomed*. 2018;14(1):1–12.
- [59] Peña-Guamán C, Guerrero-Tipantuña M, Arcos-Bósquez V. et al. Cosmovisión Etnobiológica De La Cultura Ancestral Florística De La Comunidad Kichwa Quindihua (Ecuador). *Ann Rom Soc Cell Biol*. 2021; 3109–3130.
- [60] Boillat S, Mathez S-L, Rist S. Linking local knowledge, conservation practices and ecosystem diversity: comparing two communities in the Tunari National Park (Bolivia). *Ethnobiol Conserv*. 2013;2:1–28.
- [61] Hurtado R, Palabral-Aguilera AN, Domic AI, et al. ESTUDIOS ETNOBOTÁNICOS Y FLORÍSTICOS DE LOS BOSQUES AMENAZADOS DE POLYLEPIS INCARUM Y POLYLEPIS PACENSIS (ROSACEAE) EN BOLIVIA/ Ethnobotanical and floristic studies of endangered *Polylepis incarum* and *Polylepis pacensis* (Rosaceae) forests in Bolivia. *Bonplandia*. 2018;27(2):113–126.
- [62] Zutta BR, Rundel PW, Saatchi S, et al. Prediciendo la distribución de *Polylepis*: bosques Andinos vulnerables y cada vez más importantes. *Rev Peru Biol*. 2012;19(2):205–212.
- [63] Rodríguez-Caton M, Andreu-Hayles L, Morales MS, et al. Different climate sensitivity for radial growth, but uniform for tree-ring stable isotopes along an aridity gradient in *Polylepis tarapacana*, the world's highest elevation tree species. *Tree Physiology*. 2021. doi: 10.1093/treephys/tpab021.
- [64] Fjeldsø J. *Polylepis* forests-vestiges of a vanishing ecosystem in the Andes. *Ecotropica*. 2002;8:111–123.
- [65] Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar TD, et al. Livestock's long shadow: environmental issues and options. Food & Agriculture Org. 2006
- [66] Wassenaar T, Gerber P, Verburg PH, et al. Projecting land use changes in the Neotropics: the geography of pasture expansion into forest. *Glob Environ Chang*. 2007;17(1):86–104.
- [67] Balthazar V, Vanacker V, Molina A, et al. Impacts of forest cover change on ecosystem services in high Andean mountains. *Ecol Indic*. 2015;48:63–75.
- [68] Calbi M, Clerici N, Borsch T, et al. Reconstructing long term high Andean forest dynamics using historical aerial imagery: a case study in Colombia. *Forests*. 2020;11(8):788.
- [69] Buytaert W, Céleri R, De Bièvre B, et al. Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Sci Rev*. 2006;79(1–2):53–72.
- [70] Sklenář P, Hedberg I, Cleef AM. Island biogeography of tropical alpine floras. *J Biogeogr*. 2014;41(2):287–297.
- [71] Marengo JA, Pabón JD, Díaz A, et al. Climate change: evidence and future scenarios for the Andean region. *Clim Chang Biodivers Trop Andes IAI-SCOPE-UNESCO, Paris, Fr*. 2011;110–127.
- [72] Sutherland WJ, Adams WM, Aronson RB, et al. One hundred questions of importance to the conservation of global biological diversity. *Conserv Biol*. 2009;23(3):557–567.
- [73] Sutherland WJ, Fleishman E, Mascia MB, et al. Methods for collaboratively identifying research priorities and

- emerging issues in science and policy. *Methods Ecol Evol.* [2011](#);2(3):238–247.
- [74] Sutherland WJ, Freckleton RP, Godfray HCJ, et al. Identification of 100 fundamental ecological questions. *J Ecol.* [2013](#);101(1):58–67.
- [75] Carter J, Gronow J Recent experience in collaborative forest management: a review paper. [2005](#).
- [76] Sayer J, Campbell B, Campbell BM. The science of sustainable development: local livelihoods and the global environment. Cambridge: Cambridge University Press; [2004](#).